เครื่องทำความสะอาดด้วยอัลตร้าโซนิคโดยใช้วงจรดีซีทูเอซีคอนเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ความถี่สูง

An Ultrasonic Cleaner using High Frequency Full-Bridge DC/AC Converter

บุรพา ทองมี[1] วิลาสิณีย์ จงจินากูล[1] อนุสรณ์ กุยฮวยเตีย[1] บัญชา หิรัญสิงห์[1] วีระศักดิ์ ชื่นตา[2] และ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ[3]

[1]โปรแกรมวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
bu.rapa10@hotmail, *jata_pong_taro@hotmail, lzlsungodlzl@hotmail, hirunsing@yahoo.com*
[2]โปรแกรมวิชาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
Weerasak.cheunta@gmail.com
[3]ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
kjanuwat@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นนำเสนอเครื่องทำความสะอาดด้วยอัลตร้าโซนิคโดยใช้วงจรดีซีทูเอซีคอนเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ความถี่สูง โดยใช้วงจรอินเวอร์เตอร์เป็นตัวแปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงให้เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่สูงชนิดเต็มบริดจ์และใช้ไอซีเบอร์ TL494 เป็นตัวควบคุมการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์เพื่อขับหัวอัลตร้าโซนิคทรานดิวเซอร์ ขนาด 80 วัตต์ ส่งผ่านคลื่นไปยังตัวกลางที่อยู่ในถังทำความสะอาดที่ความถี่เรโซแนนท์ ใช้มอสเฟตเป็นอุปกรณ์สวิตช์ วงจรทำงานที่ความถี่การสวิตช์ 40 กิโลเฮิรตซ์ สำหรับวงจรควบคุมการทำงานได้ประยุกต์ใช้ไอซี TL494 ในการสร้างสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม วงจรแยกกราวด์ใช้ไอซีเบอร์ TLP250 ในการแยกกราวด์ระหว่างชุดวงจรอินเวอร์เตอร์และวงจรควบคุมให้เป็นอิสระต่อกัน ส่วนโหลดนั้นใช้หัวอัลตร้าโซนิคทรานดิวเซอร์ 2 หัวในการสั่นที่ความถี่สูง บทความนี้ได้อธิบายถึงหลักการทำงานของวงจร การออกแบบ ทดสอบสมรรถนะการทำงาน พร้อมทั้งได้ทำการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม Pspice และผลทดลอง เพื่อเป็นการยืนยันตามแนวคิดที่ได้นำเสนอ

คำสำคัญ: อัลตร้าโซนิค เต็มบริดจ์อินเวอร์เตอร์ ดีซีทูเอซีคอนเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์

Abstract

This paper presents an ultrasonic cleaner using high frequency full-bridge DC/AC converter. The inverter converts the DC voltage to AC voltage using IC TL494 to control the operation of the inverter circuit. The ultrasonic wave will transmit to the tank at the resonance frequency. The switching frequency of the power MOSFETs is chosen to be 50 kHz for the control circuit. The application of IC TL494 to generate PWM signals, the separation of an IC TLP250 Jump to isolate ground circuit between the inverter and control circuits that are independent completely and 2 high frequency ultrasonic load . This paper describes the design, operation mode and performance, including PSpice simulation and experimental results, which confirms the concept idea.

Keywords: Ultrasonic, Full-Bridge Inverter, Full-Bridge DC/AC Converter

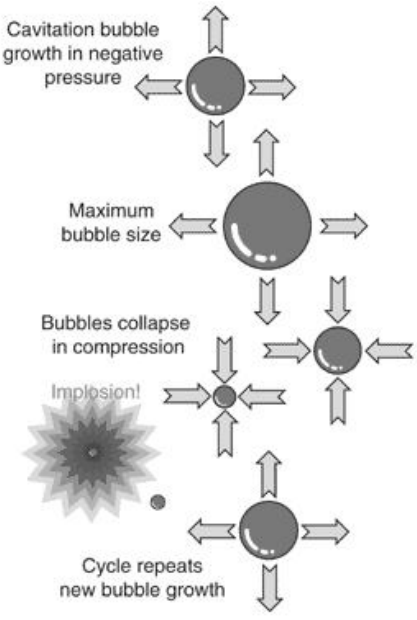
1. บทนำ

ในปัจจุบันการทำความสะอาดด้วยอัลตร้าโซนิคเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายเพราะคุณสมบัติที่โดดเด่นในการทำความสะอาดที่มีประสิทธิผลและสามารถทำความสะอาดในที่ๆ การทำความสะอาดเข้าถึงได้ยาก อีกทั้งเป็นการเปลี่ยนแปลงวิธีการทำความสะอาดอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กและยากต่อการทำความสะอาดด้วยวิธีการทำความสะอาดแบบเดิมๆ ให้มันง่ายขึ้น ในการทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิคเป็นการทำความสะอาดโดยการจุ่มชิ้นงานและล้างชิ้นงานในของเหลว (Immersion cleaning) [1] ซึ่งสามารถทำความสะอาดสิ่งสกปรกได้ ทั้งน้ำมัน สนิม หรือเศษผงฝุ่นได้เป็นอย่างดี อีกทั้งในงานส่วนที่เข้าถึงได้ยากอย่างเช่น การทำความสะอาดชิ้นส่วนของบริเวณรอยแยกหรือตามซอกเล็กๆ ของชิ้นงานก็ตาม และนอกจากนี้จะประหยัดทั้งเวลาและอุปกรณ์ที่นำมาทำความสะอาดจะไม่เกิดความเสียหายจากรอยขูดขีด อันเนื่องมาจากการขัดถูด้วย ดังนั้นในบทความนี้ได้เล็งเห็นถึงความสามารถและข้อดีของคลื่นอัลตร้าโซนิคที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการทำความสะอาด จึงขอนำเสนอหลักการออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดขนาดเล็กโดยการประยุกต์ใช้พลังงานจากคลื่นอัลตร้าโซนิค เพื่อให้ทราบถึงเงื่อนไขต่างๆ และข้อที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบโครงสร้างว่ามีองค์ประกอบใดบ้างที่ส่งผลต่อประสิทธิผลในการทำความสะอาดชิ้นงาน

2. หลักการใช้คลื่นอัลตร้าโซนิคในการทำความสะอาด

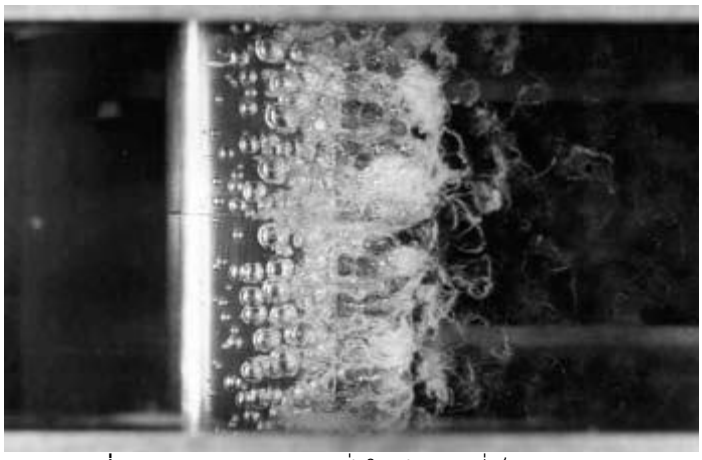
2.1 กระบวนการชำระล้าง

ในการทำความสะอาดสิ่งสกปรกจะถูกกำจัดโดยการทำละลาย,การรวมตัว หรือทำพร้อมๆ กันไป ขึ้นอยู่กับว่าการทำละลายที่ใช้นั้นสามารถทำละลายสิ่งนั้นได้หรือไม่ ผลของพลังงานกลที่ได้จากคลื่นอัลตร้าโซนิคจะช่วยเพิ่มความเร็วในการทำความสะอาด ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการทำความสะอาดให้ถูกกำจัดออกได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งกระบวนการทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิคที่ส่งผ่านพลังงานไปยังตัวกลางที่เป็นของเหลวส่วนใหญ่จะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อความเข้มของเสียงเพิ่มขึ้น (แอมพลิจูดสูง) ขนาดของความดันที่เป็นลบในบริเวณที่เกิดคลื่นจะขยายตัวจนทำให้ของเหลวเกิดการแตกตัวและเกิดฟองอากาศขึ้นซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่าคาวิเตชั่น(Cavitations) และจะแกว่ง (Oscillate) ภายใต้อิทธิพลของความดันที่เป็นบวก ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะหดตัวและขยายตัวกลับไปกลับมา เนื่องจากอิทธิพลของความดันบวก(Positive) และเมื่อมันขยายตัวจนมีขนาดที่ไม่เสถียรภาพแล้วมันจะระเบิด ซึ่งจะเรียกการระเบิดนี้ว่าอิมโพลชั่น (Implosion) และการระเบิดนี้จะทำให้เกิด Shock wave ขึ้น ถ้าฟองอากาศจำนวนมากในของเหลวถูกกระตุ้นให้เกิดการระเบิดพร้อมกันด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิกจะทำให้เกิดความดันที่สูงกว่า 10,000 PSI และอุณหภูมิที่สูงกว่า 10,000°F ณ จุดที่เกิดการระเบิด ดังภาพที่ 1 [1-2]



ภาพที่ 1 ขบวนการแตกตัวของฟองอากาศในของเหลว

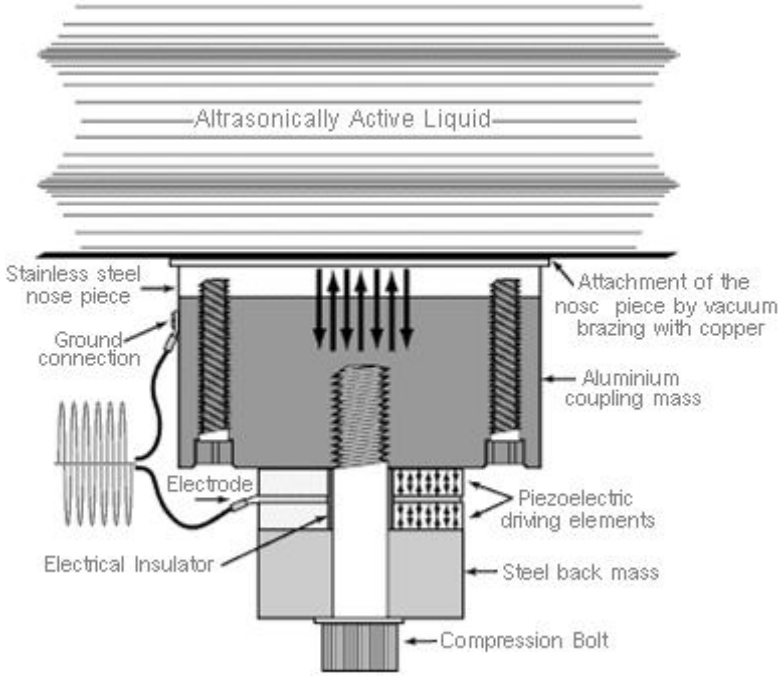
ในขบวนการดังกล่าวฟองอากาศขนาดเล็กๆ ที่มีก๊าซอยู่ภายในจะรวมกลุ่มเข้าด้วยกันพร้อมกับสิ่งสกปรกด้วย จนเพียงพอที่จะทำให้มันลอยตัวขึ้นเหนือผิวหน้าของตัวกลางที่เป็นของเหลวได้ ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ขบวนการเกิดคาวิเตชั่นในตัวกลางที่เป็นของเหลว [2]

2.2 หลักการทำงานของอัลตร้าโซนิคทรานสดิวเซอร์

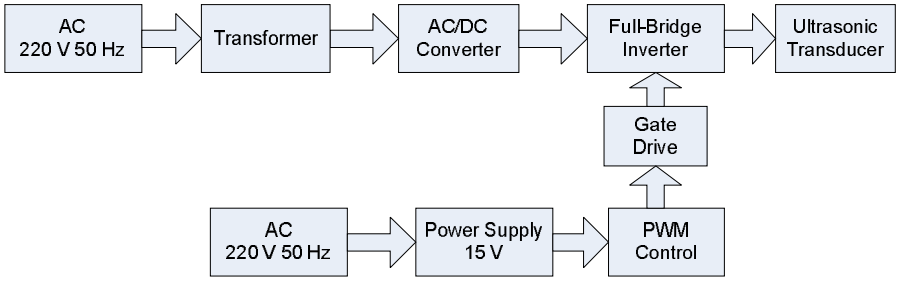
อัลตร้าโซนิคทรานสดิวเซอร์ คืออุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลโดยการสั่นไปมาทำให้เกิดคลื่นอัลตร้าโซนิกกระจายไปสู่ตัวกลางที่รองรับอัลตร้าโซนิคทรานสดิวเซอร์ ซึ่งการสั่นสะเทือนไปมานี้จะถูกส่งผ่านและแพร่กระจายไปที่แทงค์ และจะผลิตฟองอากาศคาวิเตชั่นขึ้นมาในตัวกลางของเหลวภายในแทงค์ ซึ่งฟองอากาศเหล่านี้จะจัดวางตัว (Formation) และยุบตัวลง (Collapse) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาการขัดถูขึ้น (Scrubbing) ตามที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น แสดงได้ดังในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การทำงานของ Piezoelectric Transducer [3]

3. การออกแบบ

ในส่วนนี้จะเป็นการออกแบบโครงสร้างการทำงานโดยรวมของเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิค ซึ่งมีส่วนประกอบหลักๆ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องทำความสะอาดด้วยอัลตร้าโซนิค

จากบล็อกไดอะแกรมสามารถอธิบายหลักการทำงานของเครื่องทำความสะอาดด้วยอัลตร้าโซนิคได้คือ เริ่มจากใช้แหล่งจ่ายไฟ 220V 50Hz ผ่านวงจรเรียงกระแสเพื่อสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงประมาณ 310 V ส่งผ่านไปยังวงจรภาคกำลัง (Full Bridge Inverter) เพื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ (Resonant) ให้ตรงกับหัวอัลตร้าโซนิคทรานสดิวเซอร์ที่ใช้งาน เพื่อให้หัวอัลตร้าโซนิคเกิดการสั่นสะเทือนด้วยความถี่รีโซแนนซ์ส่งผ่านพลังงานไปยังตัวถังและทำความสะอาดชิ้นงานต่อไป จากหลักการที่ได้กล่าวข้างต้น ได้ออกแบบวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรงแบบฮาร์ฟบริดจ์ โดยสามารถหาสมการเอาต์พุตของแรงดันได้ ดังสมการที่ 1 [4]-[5]

$$V_{out} = (V_{in} - V_{CE(ON)})\frac{t_{ON}}{T/2} \qquad (1)$$

โดยที่ $V_{CE(ON)}$ คือ แรงดันตกคร่อมที่ขา Collector กับ Emitter ในสภาวะนำกระแส

t_{ON}/T คือ ช่วงการทำงานของไอจีบีที

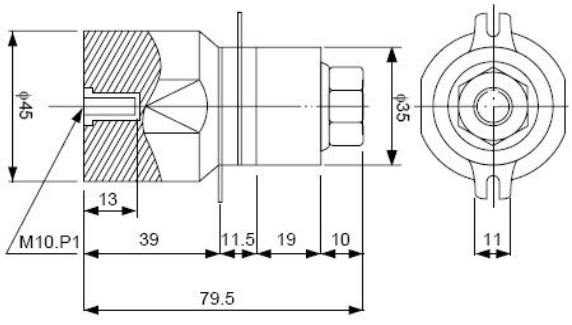
V_{in} คือ แรงดันกระแสตรงด้านเข้า

โดยชุดวงจรแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับแบบเต็มบริดจ์ได้ทำการออกแบบ มีพิกัดดังนี้

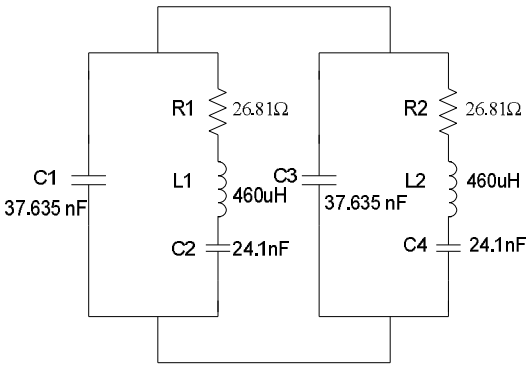
กำลังไฟฟ้าด้านออก (P_o)	80 *W*
แรงดันด้านเข้า (V_{in})	310 ± 5% *V*
แรงดันเอาท์พุต (V_{out})	150 *V*
ความถี่สวิตชิ่ง (f_s)	40 *kHz*

3.1 หัวอัลตร้าโซนิค

ในบทความนี้ได้เลือกหัวอัลตร้าโซนิคชนิดเปียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric) โดยมีความถี่รีโซแนนซ์อยู่ที่ 40 kHz ขนาด 80W แรงดันที่ใช้ 150 AC Volt, 0.25Amp อุณหภูมิไม่เกิน 80°C มีไดอะแกรมดังภาพที่ 5 [1] และโดยทั่วไปหัวอัลตร้าโซนิคจะมีวงจรสมมูล ดังภาพที่ 6 ตามลำดับ

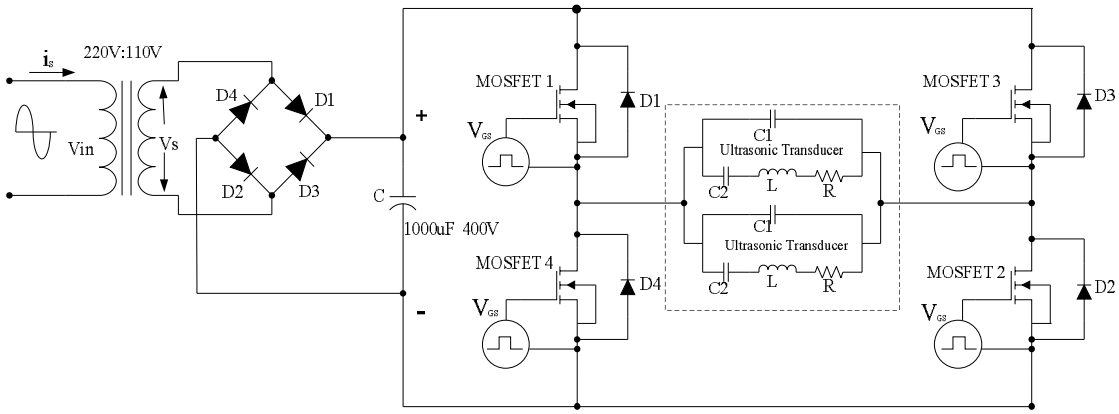


ภาพที่ 5 ไดอะแกรมหัวอัลตร้าโซนิคทรานสดิวเซอร์แบบเปียโซอิเล็กทริก



ภาพที่ 6 วงจรสมมูลหัวอัลตร้าโซนิคทรานสดิวเซอร์ที่ใช้

เมื่อนำหัวอัลตร้าโซนิกทรานสดิวเซอร์ไปวัดดูค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ด้วยเครื่อง Impedance Analyzer (HP4194A) จึงได้ค่าออกมา ดังนี้ C1 = 37.635 nF, C2 = 24.1 nF, L = 460 uH, R = 26.81 Ω โดยวัดที่ความถี่ 30 kHz [1] จากที่ได้กล่าวไปแล้ว สามารถเขียนวงจรรวมทั้งหมดของตัวเครื่องได้ ดังรูปที่ 7

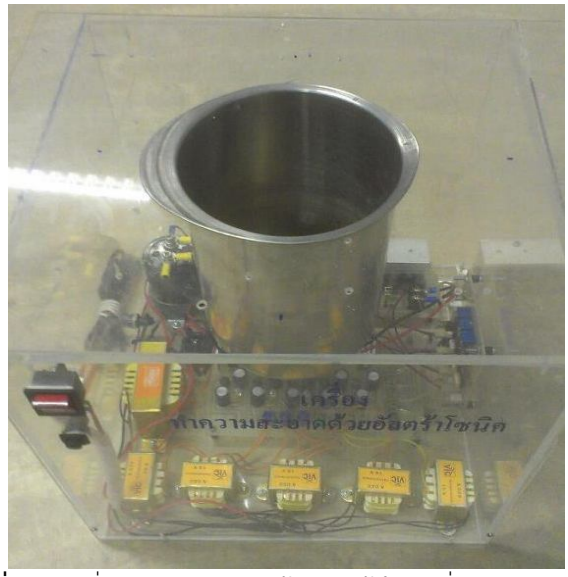


ภาพที่ 7 วงจรกำลังของเครื่องทำความสะอาดด้วยอัลตร้าโซนิค

3.2 การออกแบบตัวถังทำความสะอาด

ในส่วนของตัวถังทำความสะอาดมีหลักการออกแบบ คือ การใช้อัตราส่วนระหว่างกำลังวัตต์ของหัวอัลตร้าโซนิค (W) กับขนาดพื้นที่ก้นถังทำความสะอาด (cm^2) ให้มีความเหมาะสม กล่าวคือโดยส่วนมากแล้วเครื่องทำความสะอาดที่มีขายกันเกือบทุกยี่ห้อ ทั้งในและต่างประเทศ จะมีอัตราส่วนอยู่ที่ 0.3 - 0.5 W/cm^2 เท่านั้น [6] ดังนั้นในการออกแบบตัวถังได้ใช้แผ่นสแตนเลสหนา 1 cm ขึ้นรูปเป็นตัวถังทำความสะอาดและ ได้กำหนดอัตราส่วนกำลังต่อพื้นที่อยู่ที่ 0.57 W/cm2 โดยใช้กำลังของหัวทรานสดิวเซอร์ อยู่ที่ 80 W จึงเลือกตัวถังทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 12 cm และสูงเท่ากับ 18 cm ดังภาพที่ 8 โดยตัวเครื่องทำความสะอาดด้วยอัลตร้าโซนิคที่ประกอบเสร็จแล้ว จะแสดงดังภาพที่ 9 ตามลำดับ

ภาพที่ 8 ตัวถังทำความสะอาดที่ออกแบบสร้าง



ภาพที่ 9 ตัวเครื่องทำความสะอาดด้วยอัลตร้าโซนิคที่ประกอบเสร็จแล้ว

4. การทดสอบและประเมินผล

4.1 ขั้นตอนการทดสอบและการเลือกใช้ความถี่

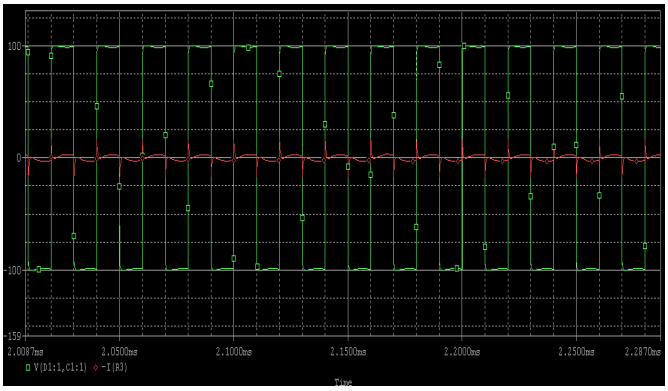
ในการทดสอบเพื่อให้การตรวจสอบการทำความสะอาดเป็นไปได้โดยง่าย จึงใช้เฟืองมอเตอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm สูง 0.4 cm ซึ่งจะมีจุดที่การทำความสะอาดเข้าถึงได้ยาก เอามาอัดด้วยจาระบีเข้าไปที่รูเล็กๆ ของตลับลูกปืนจนเต็ม พอดีทั้งด้านหน้าและด้านหลัง เพื่อให้เป็นมาตรฐานเดียวกันตลอดการทดสอบครั้งนี้ (ดังรูปที่ 10) โดยน้ำยาที่ใช้เป็นตัวกลางในการทำความสะอาดจะใช้น้ำยา MIRACHEM 500 ซึ่งมีคุณสมบัติคือไม่มีส่วนผสมที่เป็น กรด ด่าง หรืออันตราย ไม่ติดไฟ ไม่ทำลายพื้นผิว ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน เหมาะสำหรับทำความสะอาดชิ้นงานจำพวกจาระบี คราบน้ำมัน คราบคาร์บอน คราบฝุ่นและสิ่งสกปรกต่างๆซึ่งเหมาะสมกับการใช้ทำความสะอาดในการทดสอบครั้งนี้

ในการทดสอบเพื่อหาความถี่ที่เหมาะสมในการส่งผ่านพลังงานของหัวอัลตร้าโซนิคทรานสดิวเซอร์ ได้ทำการปรับความถี่ตั้งแต่ 20-50 kHz เพื่อดูการส่งผ่านกำลังสูงสุดของหัวอัลตร้าโซนิค ซึ่งจะเห็นว่าที่ความถี่ 40 kHz จะให้ค่ากำลังไฟฟ้าสูงสุดซึ่งเป็นความถี่ที่ทำให้หัวอัลตร้าโซนิคทรานสดิวเซอร์อยู่ในสภาวะรีโซแนนซ์ (Resonance) พอดี ส่วนผลการจำลองรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุตตกคร่อมหัวอัลตร้าโซนิคทรานสดิวเซอร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Pspice แสดงดังภาพที่ 11 ในส่วนของรูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุตตกคร่อมหัวอัลตร้าโซนิคทรานสดิวเซอร์ที่ทำการวัดจริงขณะทำความสะอาดชิ้นงาน แสดงได้ดังภาพที่ 12 ส่วนภาพที่ 13 แสดงประสิทธิภาพโดยรวมของอินเวอร์เตอร์เมื่อทำการปรับเปลี่ยนกำลังไฟฟ้าด้านอินพุต ซึ่งประประสิทธิภาพโดยรวมของอินเวอร์เตอร์จะอยู่ที่ประมาณ 91 เปอร์เซ็นต์

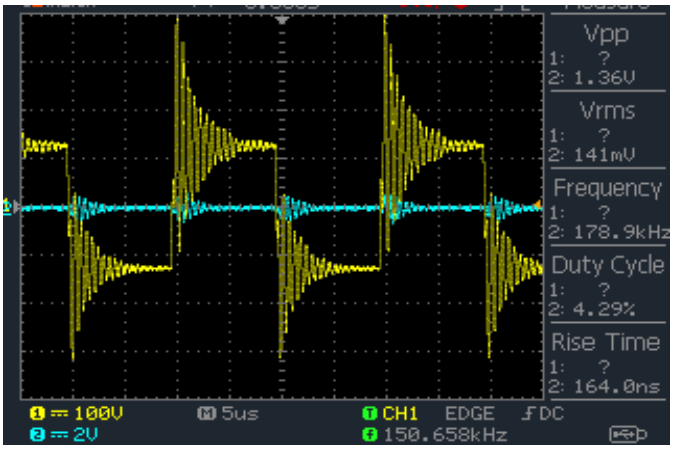
4.2 การทดสอบทำความสะอาดด้วยน้ำยาที่ระดับต่างๆ

ในการทดสอบทำความสะอาดเฟืองมอเตอร์ที่บรรจุถังทรงกระบอกขนาด 12×18 cm หนา 1 mm (0.57W/cm^2) ล้างด้วยน้ำยา MIRACHEM 500 โดยนำชิ้นงานมาชั่งก่อนและหลังทำความสะอาดพบว่า ระดับน้ำยาที่ใช้ในการทำความสะอาดมีผลต่อการทำความสะอาด กล่าวคือ เมื่อระดับน้ำยาสูงขึ้นจะทำให้ประสิทธิผลในการทำความสะอาดลดลงเมื่อเทียบกับชิ้นงานที่มีระดับน้ำยาที่อยู่ระดับใกล้เคียงกับชิ้นงาน ส่วนตารางที่ 1.1 แสดงตารางทดสอบประสิทธิภาพในการทำความสะอาดของเครื่องต้นแบบกับโลหะชิ้นงานสามชนิดคือโซ่สเตอร์ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์และฟันเฟือง ความถี่คงที่ 50 kHz ดิวตี้ไซเคิลคงที่ 50% ปรับแรงดัน 3 ค่า จะเห็นว่าที่แรงดันไฟฟ้าที่พิกัดแรงดันอินพุต 220 โวลต์ จะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด และตารางที่ 1.2 แสดงตารางทดสอบประสิทธิภาพในการทำความสะอาดของเครื่องต้นแบบกับโลหะชิ้นงานสามชนิดคือโซ่สเตอร์ แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์และฟันเฟือง แรงดันคงที่ 220 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิลคงที่ 50% ปรับความถี่ 5 ค่า จะเห็นว่าที่ความถี่ 50 kHz ซึ่งเป็นความถี่เรโซแนนซ์ จะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

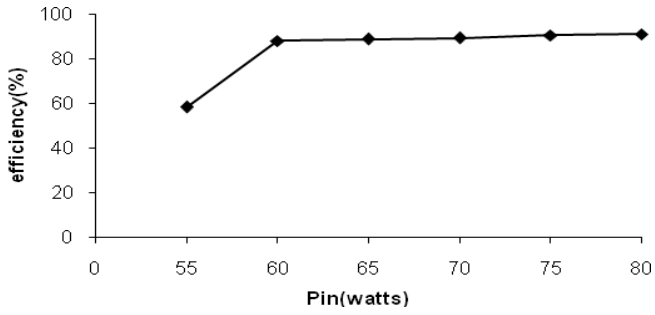
ภาพที่ 10 การเตรียมชิ้นงานที่ใช้ทดสอบในการทำความสะอาด



ภาพที่ 11 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุตจากการจำลอง



ภาพที่ 12 รูปคลื่นแรงดันและกระแสด้านเอาต์พุตจากการทดลอง



ภาพที่ 13 ประสิทธิภาพโดยรวมของอินเวอร์เตอร์

ตารางที่ 1 ตารางทดสอบประสิทธิภาพในการทำความสะอาดของเครื่องต้นแบบ ความถี่คงที่ 50 kHz ดิวตี้ไซเคิลคงที่ 50% ปรับแรงดัน 3 ค่า

แรงดัน (โวลต์)	โซ่สเตอร์		แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์		ฟันเฟือง	
	ก่อนล้าง (กรัม)	หลังล้าง (กรัม)	ก่อนล้าง (กรัม)	หลังล้าง (กรัม)	ก่อนล้าง (กรัม)	หลังล้าง (กรัม)
180	93.706	93.313	24.352	24.213	44.165	44.011
200	95.468	95.017	25.916	24.806	46.328	45.169
220	97.365	94.865	23.195	21.998	49.981	46.567

2

ตารางที่ 2 ตารางทดสอบประสิทธิภาพในการทำความสะอาดของเครื่องต้นแบบ แรงดันคงที่ 220 โวลต์ ดิวตี้ไซเคิลคงที่ 50% ปรับความถี่ 5 ค่า

ความถี่ (kHz)	โซ่สเตอร์		แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์		ฟันเฟือง	
	ก่อนล้าง (กรัม)	หลังล้าง (กรัม)	ก่อนล้าง (กรัม)	หลังล้าง (กรัม)	ก่อนล้าง (กรัม)	หลังล้าง (กรัม)
30	98.325	98.298	26.342	26.301	45.239	45.198
35	96.325	96.223	27.511	27.256	47.328	47.056
40	93.442	92.898	25.324	24.966	49.382	48.995
45	98.552	97.025	28.336	27.328	44.358	43.283
50	97.223	95.228	27.528	26.662	47.289	45.972

5. สรุปผลการทดสอบ

จากการออกแบบและทดสอบเครื่องทำความสะอาดด้วยคลื่นอัลตร้าโซนิคพบว่าเครื่องต้นแบบจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิผลจะต้องใช้ความถี่ที่อยู่ในสภาวะรีโซแนนซ์หรือสอดคล้องกับชนิดของหัวอัลตร้าโซนิค ส่วนการเลือกใช้ขนาดตัวถังทำความสะอาดนั้น ควรเลือกใช้ขนาดตัวถังที่มีอัตรากำลังต่อพื้นที่การทำความสะอาดตั้งแต่ 0.3 W/cm^2 ขึ้นไปเพื่อให้การทำความสะอาดมีประสิทธิผลและประหยัดเวลา อย่างไรก็ตามระดับของน้ำยาที่ใช้เป็นตัวกลางในการทำความสะอาด แรงดันอินพุต ความถี่ ก็เป็นปัจจัยสำคัญในการทำความสะอาด ดังนั้นจะต้องเลือกใช้ให้มีความเหมาะสมกับชิ้นงานที่นำมาทำความสะอาดด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ชาญกิต บัวศรี. “การเปรียบเทียบรูปสัญญาณการสวิตช์ที่ใช้สำหรับเครื่องทำความสะอาดด้วยอัลตร้าโซนิก”วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. ปีการศึกษา 2551.

[2] นรงฤทธิ์ เสนาจิต และ อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ, "การออกแบบและสร้างเครื่องทำความสะอาดด้วยอัลตร้าโซนิก", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 33, เชียงใหม่, ฉบับที่ 1, 1-3 ธันวาคม 2553, หน้า 697-700.

[3] A. Jangwanitlert, P. Paisuwana and T. Vijaktakul., “Ultrasonic cleaner” ,Proc. in EECON 22, Kasetsart University, Vol. 2, 2542.

[4] N. Sanajit and A. Jangwanitlert ,“ Improved Performance of a Plasma Cutting Machine Using a Half-Bridge DC/DC Converter”,The Proceeding of the IEEE International ROBIO conference, Bangkok, 2009.

[5] วีระเชษฐ์ ขันเงินและวุฒิพล ธาราธีรเศรษฐ์, อิเล็กทรอนิกส์กำลัง, พิมพ์ครั้งที่ 4, กรุงเทพฯ, ห้างหุ้นจำกัดวี.เจ.พริ้นติ้ง, 2549.

[6] “การออกแบบตัวถังของอัลตร้าโซนิก” ACME-KORNULTRASONIC ENGINEERING LTD., PART.